

含功率平衡系统的直流变压器拓扑研究

丁润初¹, 史书怀^{1,2}, 卓放¹, 王丰¹

(1. 西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

摘要: 直流输、配电网的应用会面临多种复杂的设计场景, 单极输入、真双极输出的DC/DC变换需求就是其中一种。该应用场景的双极输出在负载不平衡的情况下易导致输出电压的不均衡, 从而影响系统的稳定运行。针对上述问题, 一种用于单极到真双极变换的直流变压器与功率平衡拓扑被提出, 用以解决负载不平衡情况下的DC/DC电压变换问题。在输出的正负极之间设计功率平衡系统(power balance system, PBS), 使不平衡功率经由该系统传输, 平衡两极之间电压。最后, 仿真结果和实验结果均验证了所提拓扑的可行性。

关键词: 直流变压器; 单极; 真双极; 功率平衡系统

中图分类号: TM921 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd23142

Research on Topology of DC Transformer with Power Balance System

DING Runchu¹, SHI Shuhuai^{1,2}, ZHUO Fang¹, WANG Feng¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China;

2. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, Henan, China)

Abstract: The application of DC transmission and distribution network faces a variety of complex design scenarios, among which there are DC/DC conversion requirements with unipolar input and really bipolar output. The bipolar output of this application scenario can easily lead to unbalanced output voltage when the load is unbalanced, which can affect the stable operation of the system. In response to the above problems, a DC transformer and power balance topology for unipolar to really bipolar conversion were proposed, which could solve the problem of DC/DC voltage conversion in the case of unbalanced load. A power balance system (PBS) was designed between the output positive and negative poles, so that unbalanced power was transmitted through the system to balance the voltage between the two poles. Finally, simulation results and experimental results verify the feasibility of the proposed topology.

Key words: DC transformer; unipolar; really bipolar; power balance system (PBS)

近十五年来,在全球范围内,直流电网的研究进入快车道。中国陆续建设了多条 ± 800 kV, ± 500 kV 直流输电线路,为直流电网的建设打下了基础^[1-2]。而小型适配器、充电桩、轨道列车、光伏小镇等研究也丰富了直流微网、直流用电网等的研究发展^[3-4]。但居于输电网和用电网之间的直流配电网在近四、五年才陆续开展研究。直流配电网由于涉及到新能源的并网、多级输电网汇入、用电功率分配等多种功能,因此其应用场景是直流网络里最为多样和复杂的^[5]。直流变

压器作为直流输配电网中的核心设备,承担电压等级变换、功率传输、故障隔离等作用。故而直流变压器的多场景适应性也是核心研究点之一。

输入侧为单极、输出侧为真双极的应用场景就是其中的一种。单极和真双极是直流输配电网中最常用的两种结构。单极结构简单,但系统可靠性弱。真双极结构复杂、成本高,但增加了系统的可靠性^[6]。一般情况下输入和输出均为单极或均为真双极,便于直流变压器的拓扑设计与工程实施。但在实际工程中,由于地理条件的限制,或经

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904700)

作者简介: 丁润初(1996—),男,硕士,Email: dingrunchu@stu.xjtu.edu.cn

通讯作者: 卓放(1962—),男,教授,Email: zffz@mail.xjtu.edu.cn

济成本的考量,会出现一侧单极一侧真双极的应用场景。最典型的应用是海岛风电传输。文献[7-8]介绍了由于海岛地理环境的限制,输入侧采用单极结构。在城市示范区等区域,可用建设区域狭小,但又需要保证供电可靠性,也会出现输入侧单极、输出侧真双极的应用情况^[9]。两端拓扑不对称带来的最大问题是真双极的正、负极之间负载不平衡时极易导致供电电压不平衡,进而增大某一极的设备使用压力和设计容量。交流电网中出现负载不平衡时,可以通过控制三相交流电的正负序电流来达到输出电压的平衡^[10]。其根本原因是相当于有三个单相电路并联运行。因此交流电网中治理负载不平衡的方法难以借鉴到直流电网中。现有的直流变压器拓扑对上述应用场景的适应性也表现出不足。文献[11-15]提及了多种直流变压器拓扑,包括双有源桥(dual-active-bridge, DAB)级联型拓扑、面对面(face-to-face, F2F)型拓扑、自耦变压器拓扑等。但这些拓扑都是用于输入、输出对称的场景。在实现海岛电能传输时,文献[7]提出两个DAB级联型拓扑输入并联、输出串联实现单极到真双极的变换。在此基础上,文献[8]为了减小设备成本,考虑在直流变压器的交流变换环节并联。依照文献[16-17]的思路,上述几种直流变压器拓扑均可通过输入并联、输出串联的方式实现单极到真双极的变换。但该思路会增加几乎一倍的设备成本。目前针对单极到真双极场景的拓扑研究较少,有一些多端电力电子变压器的应用^[15, 18-19]可以借鉴。DAB级联型拓扑中的子模块换为三端口DC/DC子模块,并将两个输出串联,可以实现单极到双极变换^[18-19]。但其中高频变压器的设计、输出串联后子模块之间的环流问题,都未有深入的研究。

本文根据单极到真双极变换时负载不平衡的特点,提出一种新的直流变压器拓扑设计方案。在真双极的两极之间增加功率平衡系统(power balance system, PBS)。PBS只处理负载不平衡导致的不平衡功率,使两极之间的差值功率通过PBS处理,从而减小整个直流变换环节的设备容量需求。最后在Matlab/Simulink中搭建了相应的仿真模型并设计了实验平台,验证了该方案的可行性。

1 直流变压器与功率平衡系统拓扑

图1为本文所提直流变压器与功率平衡系

统拓扑。

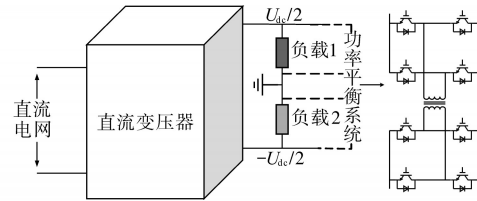


图1 直流变压器与功率平衡系统拓扑

Fig.1 DC transformer and power balance system

图1中,单极直流输入通常由电网接入或风电、光伏等的新能源直流接入。负载1与负载2串联后接入直流变压器的输出,两负载之间引出地线,由直流变压器实现单极到真双极的变换。负载1与负载2可以为低电压等级直流电网、用电负荷等多种形式。直流变压器为电压控制型输出,维持下级母线电压的稳定,直流变压器的输出电压为 U_{dc} ,负载1、负载2的电压、功率分别为 V_{out+} , V_{out-} , P_{out+} , P_{out-} 。当负载1与负载2出现负载不平衡的情况时,两者的串联特性导致二者分压不均,即无法实现对称电压输出。图1中深色部分为功率平衡系统PBS。系统的一端连接负载1,另一端连接负载2。当负载1与负载2的电压不平衡时,PBS处理二者之间的差值功率,进而使二者输出电压达到平衡。

2 拓扑比较

目前最为成熟的实现单极到真双极变换的拓扑如图2所示。拓扑使用两个直流变压器,在单极处并联,两者的输出串联,各自接负载,中间引出地线。

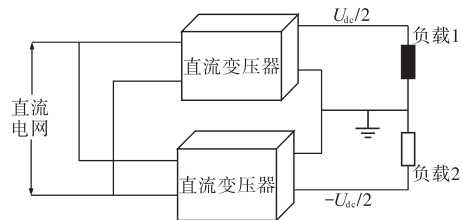


图2 单极到真双极变换拓扑

Fig.2 The topology of unipolar to true bipolar

假设两个负载平衡时每极功率 $P_{out+}=P_{out-}=P$, P 为额定功率;真双极侧的负载最大总功率设计为 $2P$ 。目前直流电网并没有定义不平衡度的公式,由于直流系统中负载1与负载2串联,因此负载、电压、功率的不平衡度相等。本文定义系统极限情况下的功率不平衡度(power unbalance factor, PUF)为 η :

$$\eta = \left| \frac{P_{\text{load}} - P}{P} \right| \times 100\% \quad (1)$$

式中: P_{load} 为正极或负极的负载功率。

设定以下两个场景进行比较。

2.1 场景1

$0 \leq P_{\text{out}+} \leq P, 0 \leq P_{\text{out}-} \leq P$,即 $P_{\text{out}+}$ 与 $P_{\text{out}-}$ 都不会超过各自线路的额定功率。

在实际生活中,该情况表示负载1与负载2都只运行在各自的设定区间,两条线路不会互为备用,也不会出现各自过载的情况。此时,图1拓扑的设备总设计功率:

$$P_{\text{总}} = 2P + \frac{\eta_{L1} + \eta_{L2}}{2} P \quad (2)$$

式中: η_{L1} 为负载1的功率不平衡度; η_{L2} 为负载2的功率不平衡度。

图2拓扑的设备总设计功率为 $2P$ 。

在场景1的设定下,由于两个负载并不会出现过载的情况,因此在图1始终会多出来PBS处理不平衡功率,系统的总设计功率会大于图2拓扑。该场景设定下本文所提拓扑不具有功率设计方面的优势。

2.2 场景2

$0 \leq P_{\text{out}+} + P_{\text{out}-} \leq 2P, 0 \leq P_{\text{out}+} \leq 2P, 0 \leq P_{\text{out}-} \leq 2P$,即负载1和负载2的总运行功率不会超过系统的额定功率。但在不同的运行时刻,某一个负载会出现过载的情况,在实际生活中,该情况表现为某一线路会突增负荷,或两线路备用运行的情况。此时,图1拓扑的设备总设计功率如式(2)所示。

图2拓扑的设备总设计功率:

$$P_{\text{总}} = 2P + (\eta_{L1} + \eta_{L2})P \quad (3)$$

在场景2的设定下,由于两个负载会在不同的时刻出现过载的情况,因此图2中两个直流变压器的额定容量需要设计满足过载功率,系统的总设计功率将大于负载的总额定功率。而图1拓扑的直流变压器仍只需要满足负载的额定功率,系统的不平衡功率由PBS处理,即由一条支路向另一条支路补偿部分功率。故而系统的总设计功率要明显小于使用两个直流变压器。由表1可以明显看出,在场景2的设定条件下,含有PBS的直流变压器拓扑能够减少设计整体系统的设计功率。

将场景2中两种拓扑的设计容量进行定量对比,绘制成图3所示的三维图。

表1 拓扑与场景对比
Tab.1 Topology and scene comparison

	场景1	场景2
含PBS系统拓扑	$P_{\text{总}} = 2P + \frac{\eta_{L1} + \eta_{L2}}{2} P$	$P_{\text{总}} = 2P + \frac{\eta_{L1} + \eta_{L2}}{2} P$
双变换器并联拓扑	$2P$	$P_{\text{总}} = 2P + (\eta_{L1} + \eta_{L2})P$

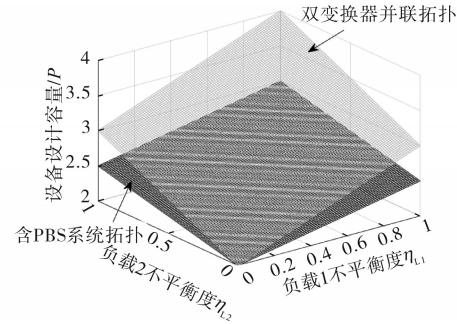


图3 设备需求功率的定量对比

Fig.3 Quantitative comparison of equipment demand power

从图3可以看出,在负载的最大总功率同为 $2P$ 时,在场景2下PBS具有明显的功率设计方面的优势。当 $\eta_{L1}=\eta_{L2}=0$ 时,两种拓扑需要的功率设计容量相等,随着负载不平衡程度的增大,含PBS拓扑的优势越来越明显。当 $\eta_{L1}=\eta_{L2}=1$ 时,负载不平衡度最大,含PBS的直流变压器拓扑设备需求容量为 $3P$,双变换器并联拓扑的设备需求容量为 $4P$,采用PBS使直流变压器的设备需求容量减少了25%。

3 控制方案设计

3.1 主电路控制方案设计

如图1所示的直流变压器拓扑并没有固定的要求。本文以F2F型拓扑作为其中直流变压器的拓扑,如图4所示。

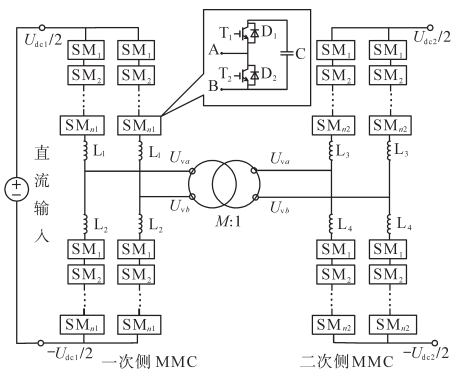


图4 F2F型直流变压器拓扑

Fig.4 The topology of F2F DC transformer

图4中,拓扑由两个模块化多电平变换器(modular multilevel converter, MMC)组成,中间由

中频变压器连接。每个MMC由4个桥臂组成,每个桥臂包含相同数目的半桥子模块。根据输入和输出电压等级的不同,2个MMC中每个桥臂的子模块数目不同。

直流变压器控制策略示意图如图5所示。F2F型直流变压器经DC/AC/DC变换,交流部分可输出方波而非正弦波,用以增加传输功率。直流变压器的输出与设定值进行比较,经PI调节后,与一次侧形成与传输功率相关的传输角。传输角度与传输功率成正比。然后对每个桥臂的各个子模块进行均压计算,得到各子模块的驱动信号,确定直流变压器中各器件的运行状态。

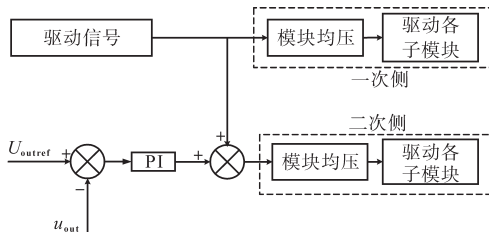


图5 直流变压器控制策略示意图

Fig.5 The schematic of the control strategy for DC transformer

3.2 功率平衡系统控制方案设计

功率平衡系统PBS主要用于处理正负极之间的不平衡功率,与直流变压器主拓扑相比传输功率较小,可采用较为简单的拓扑。但功率平衡系统的两端分别接负载1与负载2。在不同运行工况下,功率的流向不同。负载1与负载2串联,为了保证不平衡功率能流经PBS,拓扑必须采用隔离型拓扑。综上所述,用于PBS的拓扑需要满足如下条件:1)功率双向流动;2)具有隔离能力。故而本文选择DAB拓扑,设计如图6所示控制策略。

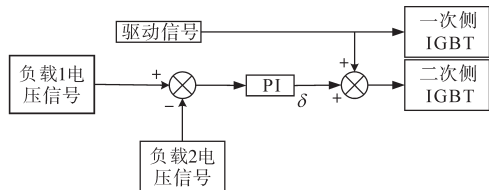


图6 DAB拓扑的控制策略示意图

Fig.6 The schematic of the control strategy for DAB

DAB的两端分别接负载1与负载2。二者的电压信号进行比较,其差值经过PI调节得到功率传输的移相角 δ 。DAB的一侧由驱动信号开环驱动,另一侧对应桥臂由驱动信号移相 δ 进行闭环驱动。DAB的每侧的1,4桥臂状态相同,2,3桥臂状态相同,1,2桥臂状态相反。经由该控制策略,负载1与负载2的电压趋近于同一电压。

在目前实际工程中直流变压器主要采用

DAB级联型拓扑和F2F型拓扑。对于DAB级联型拓扑,PBS的拓扑与其子模块拓扑一致,在设备需求容量降低的情况下整体的DAB子模块数量减少,其造价必然降低。而F2F型拓扑是适用于高电压场景下的设备,功率器件多,造价高,使用DAB作为PBS对其经济性的提升效果更好。因此,对于主流直流变压器拓扑,单位传输功率下的PBS造价不高于直流变压器造价,降低设备需求容量能够节省成本,当 $\eta_{L1}=\eta_{L2}=1$ 时,在只考虑主电路的情况下,设备成本至少降低了25%。

4 仿真与实验分析

4.1 仿真分析

本文在Matlab/Simulink中搭建如图1所示仿真模型。其中直流变压器主拓扑使用子模块为半桥模块的F2F型拓扑,功率平衡系统使用DAB拓扑。负载为电阻性负载。仿真模型的参数如下:输入侧母线电压20 kV,直流变压器输出电压6 kV,系统输出电压 ± 3 kV,负载1电阻100 Ω 或断开,负载2电阻50 Ω 或断开。

参考最新制定的国家标准《中低压直流配电电压导则》^[20],本文选取20 kV作为直流配电网的输入电压, ± 3 kV作为直流输出电压。真双极侧的正负极负载分别设定为100 Ω 和50 Ω ,表示正负极之间负载不平衡情况。另外考虑系统的极限运行情况,包括负载1断路或者负载2断路的情况。

图7为负载1为100 Ω 、负载2为50 Ω 的仿真结果。由图7可以看出,经过短时间的电压波动调整后,输出的正极和负极均趋向于同一电压。由于直流变压器的输出电压为6 kV,正负极的最终输出电压稳定在 ± 3 kV。两极的电压波动均在标准规定的-5%~+5%之间。

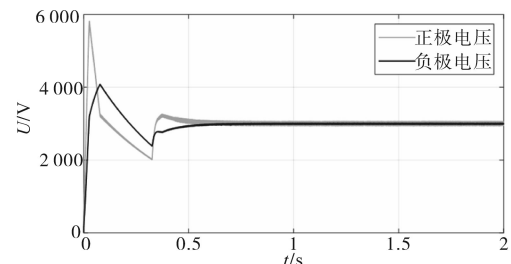


图7 负载不平衡时的电压波形

Fig.7 The voltage waveforms when load unbalanced

图8为没有PBS时系统的电压输出情况。可以看出,没有任何处理的情况下,负载的电压受

负载比例的影响。负载不平衡的极限情况为一个负载保持不变,另一个处于空载的情况,即负载1处于断路或负载2处于断路。

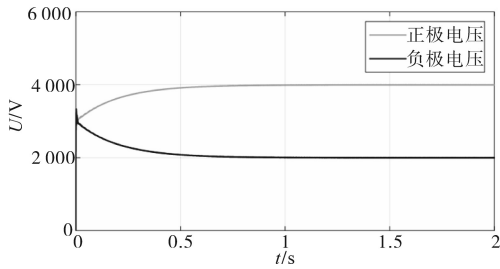


图8 无PBS的电压波形

Fig.8 The voltage waveforms without PBS

图9为具有PBS时负载1正常、负载2断路时的电压波形。图10为具有PBS时负载1断路、负载2正常时的电压波形。由图9、图10可以看出,在某一极断路的情况下,系统由于PBS的存在,输出的两极电压经过短时的调整,依然可以趋向于同一电压,且两极的电压波动也满足标准规定的范围。

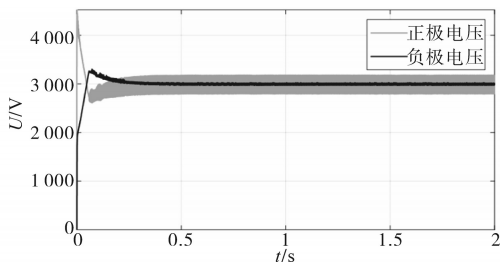


图9 负载2断路时的电压波形

Fig.9 The voltage waveforms without load 2

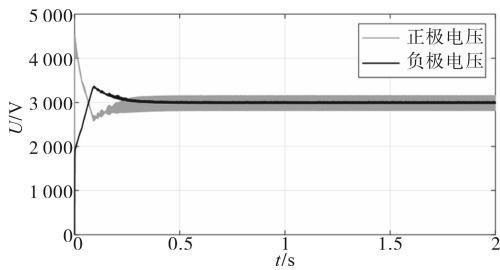


图10 负载1断路时电压波形

Fig.10 The voltage waveforms without load 1

4.2 实验分析

搭建具有PBS的直流变压器实验平台,实验的主电路由IGBT搭建,控制部分由dSPACE控制器完成。直流变压器部分采用图3所示的F2F型直流变压器拓扑,搭建的实验平台如图11所示,能量平衡系统采用DAB拓扑,由两个H桥中间经过高频变压器组成,H桥电路板如图12所示。实验参数如下:直流变压器输入电压50V,直流变压器输出电压40V,逆变侧每桥臂模块数4,整

流侧每桥臂模块数4,负载1电阻25Ω,负载2电阻75Ω。

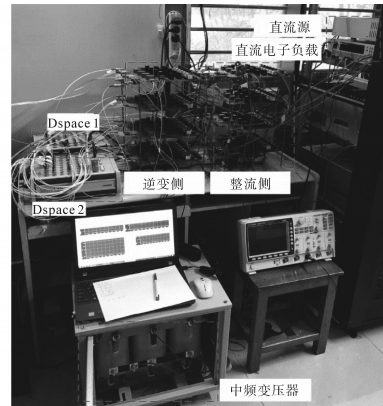


图11 DCT实验平台

Fig.11 The experimental platform of DCT

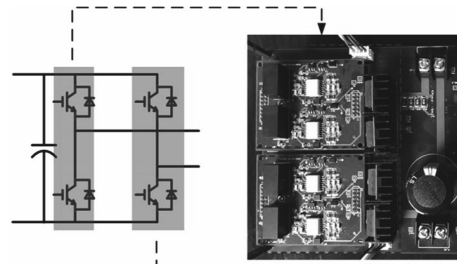


图12 H桥电路板

Fig.12 The circuit board of H-bridge

实验得到图13所示实验波形。两个负载的电压分别为10V和30V。在 t_2 时刻PBS投入运行后,两个电压趋于一致。经过短暂的系统调整后,两个负载的电压趋向一致。实验的控制器使用半实物仿真系统,由于控制步长与控制精度的问题,两个负载的电压没有完全重合。

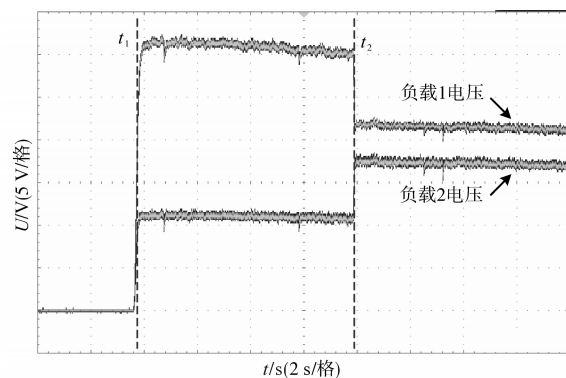


图13 实验波形

Fig.13 The experiment waveforms

5 结论

随着直流发电单元的推广,直流负荷的大量增加,处于传输关节的直流配电网研究成为重中

之重。而源荷的多样性又决定了直流配电网应用场景和应用需求的多样性。本文针对直流配电网中其中一种应用场景——单极输入到真双极输出的DC/DC变换,提出一种直流变压器与功率平衡拓扑,用来解决该应用场景下负载不平衡的问题。

1)将单极到真双极变换场景下负载不平衡的情况分为两种场景,讨论了两种场景下负载的运行情况、直流变压器的设计需求。

2)分析了直流变压器在两种场景下的冗余要求。在第二种场景中,本文所提直流变压器与功率平衡拓扑具有功率设计的优势,能够减少DC/DC变换系统的容量设计需求。

3)对所提出的拓扑进行了仿真分析和实验分析,验证了本文所提拓扑的可行性。在多种运行工况下,该拓扑能够平衡正负极的输出电压,减小负载不平衡对系统运行的影响。

参考文献

- [1] 姚良忠,吴婧,王志冰,等.未来高压直流电网发展形态分析[J].中国电机工程学报,2014,34(34):6007-6020.
Yao Liangzhong, Wu Jing, Wang Zhibing, *et al.* Pattern analysis of future HVDC grid development[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6007-6020.
- [2] 张东霞,姚良忠,马文媛.中外智能电网发展战略[J].中国电机工程学报,2013,33(31):2-14.
Zhang Dongxia, Yao Liangzhong, Ma Wenyuan. Development strategies of smart grid in China and abroad[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 2-14.
- [3] 王守相,陈思佳,谢颂果.考虑安全约束的交直流配电网储能与换流站协调经济调度[J].电力系统自动化,2017,41(11):85-91.
Wang Shouxiang, Chen Sijia, Xie Songguo. Security-constrained coordinated economic dispatch of energy storage systems and converter stations for AC/DC distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 85-91.
- [4] 姚伟锋,赵俊华,文福拴,等.配电系统与电动汽车充电网络的协调规划[J].电力系统自动化,2015,39(9):10-18.
Yao Weifeng, Zhao Junhua, Wen Fushuan, *et al.* Coordinated planning for power distribution system and electric vehicle charging infrastructures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 10-18.
- [5] Transmission O. Grid 2030: a national vision for electricity's second 100 years[Z]. United States Office of Electric Transmission & Distribution, 2003.
- [6] 陈继开,孙川,李国庆,等.双极MMC-HVDC系统直流故障特性研究[J].电工技术学报,2017,32(10):53-60,68.
Chen Jikai, Sun Chuan, Li Guoqing, *et al.* Study on characteristics of DC fault in bipolar MMC-HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 53-60, 68.
- [7] 黄震.未来海上直流型风电场单双极性转换接口DC-DC变换器的研究[D].上海:上海交通大学,2015.
Huang Zhen. Research on unipolar-to-bipolar interface DC-DC converter for future DC-based offshore wind farms[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015.
- [8] Hang Z, Miao Z, Zhang J, *et al.* Topology and operation mechanism of monopolar-to-bipolar DC-DC converter interface for DC grid[C]//Power Electronics & Motion Control Conference. IEEE, 2016.
- [9] 于金镒,刘健,徐立,等.大型城市核心区配电网高可靠性接线模式及故障处理策略[J].电力系统自动化,2014,38(20):74-80.
Yu Jinyi, Liu Jian, Xu Li, *et al.* Distribution grids of high reliability for core areas of large cities[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 74-80.
- [10] 翟灏,卓放,易皓,等.基于SVG的电网多节点电压不平衡综合抑制方法[J].电力系统自动化,2017(12):45-52.
Zhai Hao, Zhuo Fang, Yi Hao, *et al.* SVG based comprehensive unbalance suppression method for multi-node voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 40-47.
- [11] 杨晓峰,郑琼林,林智钦,等.用于直流电网的大容量DC/DC变换器研究综述[J].电网技术,2016,40(3):670-677.
Yang Xiaofeng, Zheng Qionglin, Lin Zhiqin, *et al.* Survey of high power DC/DC converter for HVDC grid application[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 670-677.
- [12] Engel S P, Stieneker M, Soltan N, *et al.* Comparison of the modular multilevel DC converter and the dual-active bridge converter for power conversion in HVDC and MVDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(1): 124-137.
- [13] Kenzelmann S, Rufer A, Dujic, *et al.* Isolated DC/DC structure based on modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(1): 89-98.
- [14] 林卫星,文劲宇,程时杰.直流-直流自耦变压器[J].中国电机工程学报,2014,34(36):6515-6522.
Lin Weixing, Wen Jinyu, Cheng Shijie. DC-DC autotransformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(36): 6515-6522.
- [15] 李子欣,王平,楚遵方,等.面向中高压智能配电网的电力电子变压器研究[J].电网技术,2013,37(9):2592-2601.
Li Zixin, Wang Ping, Chu Zunfang, *et al.* Research on medium- and high-voltage smart distribution grid oriented power electronic transformer[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2592-2601.
- [16] 付超,高振,孙玉巍,等.混合模块化直流固态变压器II:动态特性及快速响应控制[J].电工技术学报,2019,34(14):2980-2989.
Fu Chao, Gao Zhen, Sun Yuwei, *et al.* Hybrid modular direct current solid state transformer II: dynamic characteristic and

(下转第25页)

边沿实时独立进行,更适合用于查表控制的场合。同时设计了非线性处理环节,在电流幅值较小时减少调节幅度,在同等调节能力的前提下,减少了对输出电压造成的畸变。

由仿真数据证明了本方法中点平衡抑制能力较好,且电流谐波明显减小。

参考文献

- [1] 马小亮.高性能变频调速及其典型控制系统[M].北京:机械工业出版社,2010.
Ma Xiaoliang. High performance frequency control technology and its typical control system[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [2] Newton C, Summer M. A novel arrangement for balancing the capacitor voltages of a five-level diode clamped inverter[C]// IEE Seventh International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives, London: IEE, 1998:465-470.
- [3] Mishra M K, Joshi A, Ghosh A. Control schemes for equalization of capacitor voltages in neutral clamped shunt compensator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(2): 538-544.
- [4] Yazdani A, Irvani R A. Generalized state-space averaged model of the three-level NPC converter for systematic DC-voltage-balancer and current-controller design[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1105-1114.
- [5] Menzies R W, Steimer P, Steinke J K. Five level GTO inverter for large induction motor drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30(4): 938-944.
- [6] 姜卫东,杨柏旺,黄静,等.不同零序电压注入的NPC三电平变频器中点电位平衡算法的比较[J].中国电机工程学报, 2013, 33(33): 17-25.
Jiang Weidong, Yang Baiwang, Huang Jing, et al. Comparisons

- of the neutral point voltage balancing algorithm for NPC three-level inverters based on different zero-sequence voltage injection[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(33): 17-25.
- [7] 冯晓云,宋文胜.一种基于零序电压分量注入的单相三电平载波PWM算法[J].电工技术学报, 2013, 28(4): 141-147.
Feng Xiaoyun, Song Wensheng. A single phase three-level carrier-based PWM scheme with zero-sequence voltage injection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 141-147.
- [8] 金舜,钟彦儒.一种新颖的同时考虑中点电位平衡和窄脉冲消除及死区补偿的三电平空间矢量脉宽调制方法[J].中国电机工程学报, 2005, 25(6): 60-66.
Jin Shun, Zhong Yanru. A novel three-level SVPWM algorithm considering neutral-point control and narrow-pulse elimination and dead-time compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 60-66.
- [9] 宋文祥,陈国呈,武慧,等.一种具有中点电位平衡功能的三电平空间矢量调制方法及其实现[J].中国电机工程学报, 2006, 26(12): 95-100.
Song Wenxiang, Chen Guocheng, Wu Hui, et al. A novel SVPWM strategy and its implementation considering neutral-point potential balancing for three-level NPC inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 95-100.
- [10] Beig Abdul Rahiman, Narayanan G, Ranganathan V T. Modified SVPWM algorithm for three level VSI with synchronized and symmetrical waveform[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(1): 486-494.
- [11] Bows S R, Holliday Derrick. Optimal regular-sample PWM inverter control techniques[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(3): 1547-1559.

收稿日期:2021-06-02

修改稿日期:2021-12-08

(上接第19页)

- rapid response control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(14): 2980-2989.
- [17] 付超,武承杰,孙玉巍,等.混合模块化直流固态变压器I:工作原理及稳态特性分析[J].电工技术学报, 2019, 34(S1): 141-153.
Fu Chao, Wu Chengjie, Sun Yuwei, et al. Hybrid modular DC solid state transformer I: working principle and analysis of steady state characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 141-153.
- [18] Zhao C, Round S D, Kolar J W. An isolated three-port bidirectional DC-DC converter with decoupled power flow management[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2443-2453.

- [19] Wang Y, Han F, Yang L, et al. A three-port bidirectional multi-element resonant converter with decoupled power flow-management for hybrid energy storage systems[J]. IEEE Access, 2018: 1.
- [20] 中国科学院电工研究所,中机生产力促进中心,中国电力科学研究院,等. GB/T 35727—2017. 中低压直流配电电压导则[S].北京:中国国家标准化管理委员会, 2017.
IEECAS, CPCM, CEPRI, et al. Guideline for standard voltages of medium and low voltage DC distribution system[S]. Beijing: Standardization Administration of the People's Republic of China, 2017.

收稿日期:2021-03-02

修改稿日期:2021-05-31